Jurnal Penelitian Inovatif (JUPIN)
Vol. 6, No. 5, November 2026, Hal. 3839-3850
https://jurnal-id.com/index.php/jupin

DOI: https://doi.org/10.54082/jupin.2933
p-ISSN: 2808-148X
e-ISSN: 2808-1366

Evaluasi Kinerja dan Kesesuaian Desain Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di Pabrik Kelapa Sawit (PKS) PT. X Provinsi Aceh

Muhammad Haikal[1], Syarifah Seicha Fatma[2], Samsul Rida[3], Zaudhatul Ulya[*4]

[1,2,3] Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Ar Raniry Banda Aceh, Indonesia
[4] Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Indonesia
Email: [1]muhammad.haikal@ar-raniry.ac.id, [2]zaudatulya@usk.ac.id

Abstrak

Limbah cair kelapa sawit atau *Palm Oil Mill Effluent* (POME) mengandung bahan organik, padatan tersuspensi, serta minyak dan lemak dalam konsentrasi tinggi yang berpotensi mencemari badan air apabila dibuang tanpa pengolahan memadai. Kondisi ini mendorong perlunya evaluasi kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) secara berkala di Pabrik Kelapa Sawit (PKS) PT. X di Provinsi Aceh guna memantau kinerja IPAL secara keseluruhan. Penelitian ini bertujuan menganalisis kualitas air limbah POME pada *inlet* dan *outlet* IPAL, efektivitas pengolahan setiap unit IPAL, serta kesesuaian aspek teknis IPAL terhadap kriteria desain. Metode yang digunakan adalah kuantitatif dengan pendekatan deskriptif-analitis melalui pengujian sebanyak 5 sampel dari setiap unit untuk parameter BOD, COD, TSS, pH, minyak dan lemak, dan/atau Nitrogen Total yang selanjutnya effluent akhir IPAL dibandingkan dengan baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Lampiran III Tahun 2014. Selanjutnya, setiap unit pengolahan dievaluasi berdasarkan kesesuaian desain standar mengacu pada literatur dan dokumen PT. X. Hasil penelitian menunjukkan *effluent* akhir IPAL belum sepenuhnya memenuhi baku mutu, yaitu hanya parameter TSS, minyak dan lemak dan pH yang memenuhi baku mutu. Sedangkan parameter BOD, COD dan Nitrogen Total masih melampaui ambang batas meskipun efisiensi penyisihan rata-rata parameter mencapai 73 - 97%. Berdasarkan kesesuaian desain, hanya unit fat pit yang memenuhi kriteria desain, sementara unit *cooling pond*, anaerobik, dan sedimentasi terdapat parameter kriteria yang tidak sesuai. Secara umum, ketidaksesuaian parameter umumnya terdapat pada *Hydraulic Retention Time* (HRT) yang nilainya lebih kecil daripada kriteria desain akibat adanya pendangkalan oleh sedimen di dasar kolam unit pengolahan. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kinerja IPAL belum optimal dan memerlukan perbaikan melalui pengurasan lumpur (*desludging*) berkala, optimalisasi unit *cooling pond* dan penambahan unit nitrifikasi untuk penyisihan Nitrogen Total.

Kata kunci: *Efisiensi Penyisihan, IPAL, Kriteria Desain, Pendangkalan Sedimen, POME*

Abstract

Palm Oil Mill Effluent (POME) contains high concentrations of organic matter, total suspended solids, as well as oil and grease, which have the potential to pollute water bodies if discharged without adequate treatment. This condition drives the need for regular evaluation of the Wastewater Treatment Plant (WWTP) performance at the crude palm oil mill of PT. X in Aceh Province to monitor the overall efficiency of the WWTP. This study aims to analyze the quality of POME wastewater at the WWTP inlet and outlet, the treatment effectiveness of each WWTP unit, and the compliance of the WWTP's technical aspects with the design criteria. A quantitative method with a descriptive-analytical approach was employed by testing 5 samples from each unit for BOD, COD, TSS, pH, oil and grease, and/or Total Nitrogen parameters, where the final WWTP effluent was subsequently compared against the regulatory standards of the Minister of Environment Regulation Number 5 Appendix III of 2014. Furthermore, each treatment unit was evaluated based on standard design compliance referencing literature and PT. X's internal documents. The results indicated that the final WWTP effluent did not fully meet the environmental quality standards, as only TSS, oil and grease, and pH parameters were compliant. Meanwhile, BOD, COD, and Total Nitrogen parameters still exceeded the thresholds despite the average removal efficiency reaching 73 - 97%. In terms of design compliance, only the fat pit unit met the design criteria, whereas the cooling pond, anaerobic, and sedimentation units exhibited non-compliant parameters. In general, the non-compliance was commonly found in the Hydraulic Retention Time (HRT), which values were shorter than the design criteria due to shallowing caused by sediment accumulation at the bottom of the treatment ponds. This study concludes that the WWTP performance is not yet optimal and requires improvements through regular desludging, optimization of cooling pond units, and the addition of a nitrification unit for Total Nitrogen removal.

Jurnal Penelitian Inovatif (JUPIN)
Vol. 6, No. 5, November 2026, Hal. 3839-3850
https://jurnal-id.com/index.php/jupin

DOI: https://doi.org/10.54082/jupin.2933
p-ISSN: 2808-148X
e-ISSN: 2808-1366

Keywords: *Treatment Efficiency, WWTP, Design Criteria, Sediment Shallowing*

1. PENDAHULUAN

Indonesia dikenal sebagai negara agraris yang memiliki ketergantungan besar terhadap sektor pertanian, terutama sub sektor perkebunan yang memberikan kontribusi signifikan terhadap pembangunan ekonomi nasional. Diantara komoditas unggulan, kelapa sawit merupakan salah satu komoditas strategis yang berperan penting dalam memperkuat devisa negara (Barus & Ahsan, 2025). Secara global, luas areal perkebunan kelapa sawit menunjukkan tren peningkatan yang signifikan, yakni lebih dari 150% dalam tiga dekade terakhir (Ritonga et al., 2021). Terdapat 23,98 juta hektare perkebunan sawit global pada 2021, dengan pemetaan tahun tanam sejak 1990 (Descals et al., 2024).

Provinsi Aceh merupakan salah satu wilayah dengan potensi yang besar untuk pengembangan perkebunan kelapa sawit dan merupakan salah satu pusat utama kegiatan perkebunan di Indonesia. Potensi ini didukung oleh kondisi iklim dan tanah yang menguntungkan, ketersediaan lahan yang memadai, serta pertumbuhan yang relatif cepat di sektor perkebunan, baik pada skala perusahaan swasta maupun perkebunan kecil (Kahani et al., 2024). Wilayah Aceh Utara merupakan wilayah dengan tingkat kesesuaian iklim untuk pengembangan sawit yang tinggi di Provinsi Aceh berdasarkan data curah hujan dan suhu rata-rata tahunan (Jamidi et al., 2025).

Seiring dengan bertumbuhnya area kebun kelapa sawit, keberadaan pabrik kelapa sawit (PKS) sebagai industri hilirisasi menjadi hal yang tidak terpisahkan. Proses pengolahan yang berlangsung di pabrik kelapa sawit (PKS) tidak hanya menghasilkam produk utama yaitu *Crude Palm Oil* (CPO), namun juga produk samping seperti cangkang dan air limbah proses (Supijatno, 2015). Salah satu bentuk limbah yang paling signifikan adalah air limbah, yang dikenal sebagai *Palm Oil Mill Effluent* (POME). Limbah ini muncul sebagai konsekuensi langsung dari pengolahan kelapa sawit sehingga kualitas dan kuantitasnya menimbulkan dampak lingkungan yang perlu dikelola secara tepat. POME merupakan salah satu bentuk limbah organik utama dalam industri agroindustri yang dihasilkan sebagai produk sampingan dari proses pengolahan minyak sawit mentah (Crude Palm Oil/CPO) dan inti sawit (Dewi & Lamona, 2025).

Limbah POME memiliki karakteristik berwarna kecoklatan dengan konsentrasi *Chemical Oxygen Demand* (COD) dan *Biological Oxygen Demand* (BOD) yang sangat tinggi yaitu mencapai 68.000 mg/L dan 50.000 mg/L sehingga meningkatkan dampak pencemaran menurunnya kebutuhan oksigen air terhadap badan air permukaan yang menerima limbah (Devianto & Sasongko, 2021). Selain itu, POME bersifat asam dengan rentang pH 3,5 yang memperburuk dampaknya terhadap ekosistem perairan dan biota air. Dari segi komposisi, limbah ini didominasi oleh air sebanyak 95%, diikuti oleh 4–5% bahan terlarut dan terdispersi seperti selulosa, protein, serta lemak, serta 0,5–1% sisa minyak. Selain itu, kadar Total Suspended Solid (TSS) pada POME tergolong tinggi, berkisar 40.000 mg/L, disertai konsentrasi logam berat seperti tembaga (Cu) sebesar 0,89 mg/L, besi (Fe) 46,5 mg/L, seng (Zn) 2,3 mg/L, dan amonia 35 mg/L. Komposisi ini menekankan urgensi pengelolaan yang tepat untuk mencegah degradasi lingkungan (Yonas & Irzandi, 2012).

Komposisi POME yang kaya akan bahan organik, padatan tersuspensi, sisa minyak, dan logam berat menunjukkan potensi polusi yang tinggi jika tidak dikelola dengan baik (Saad et al., 2021; Tang et al., 2024). Tingginya konsentrasi bahan pencemar tersebut menyebabkan penurunan kualitas badan air penerima jika instalasi pengolahan air limbah (IPAL) pada suatu industri Pabrik Kelapa Sawit (PKS) tidak bekerja dengan optimal (Meena et al., 2023; Vijayan et al., 2024). Karakteristik ini menekankan bahwa pembuangan limbah cair secara langsung tanpa pengolahan yang memadai dapat menimbulkan pencemaran sungai dan perairan yang serius. Dengan demikian, pembuangan limbah cair dari pabrik minyak sawit yang tidak diatur secara tepat berpotensi menimbulkan kerusakan lingkungan yang signifikan, termasuk penurunan kualitas air di sungai, yang selanjutnya mengancam keberlangsungan ekosistem akuatik serta kesejahteraan masyarakat setempat.

Dalam upaya menjaga kualitas lingkungan, pemerintah melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 (Lampiran III) telah menetapkan baku mutu air limbah

DOI: https://doi.org/10.54082/jupin.2933
p-ISSN: 2808-148X
e-ISSN: 2808-1366

bagi kegiatan usaha industri minyak sawit. Regulasi tersebut membatasi beban pencemaran air limbah maksimum yang diperbolehkan untuk dibuang ke lingkungan. Parameter yang diatur mencakup batas maksimal *Biological Oxygen Demand* (BOD) sebesar 100 mg/L, *Chemical Oxygen Demand* (COD) 350 mg/L, *Total Suspended Solids* (TSS) 250 mg/L, minyak dan lemak 25 mg/L, total nitrogen 50 mg/L, serta rentang pH pada 6,0–9,0 (Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia, 2014).

Ketentuan regulasi ini mewajibkan setiap pabrik kelapa sawit (PKS) untuk mengoptimalkan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) sebelum limbah cair atau *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dilepaskan ke badan air penerima (Nabilah et al., 2022). Optimalisasi IPAL memegang peran yang sangat penting dalam mereduksi kandungan polutan organik yang tinggi pada POME, sehingga keseimbangan ekosistem perairan di sekitarnya dapat terhindar dari dampak pencemaran yang merusak (Astuty et al., 2025). Meskipun demikian, fluktuasi debit dan tingginya beban organik sering kali menyebabkan kinerja IPAL tidak stabil, sehingga evaluasi teknis secara berkala mutlak diperlukan (Trianita et al., 2026). Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk mengevaluasi kinerja IPAL eksisting dalam menyisihkan beban pencemar POME, sekaligus melakukan evaluasi teknis terhadap kriteria desain merujuk pada literatur standar dan data operasional Perusahaan (Irvan, 2018).

Meskipun infrastruktur IPAL telah tersedia, operasional pengolahan limbah cair di lapangan kerap menghadapi dinamika yang kompleks. Fluktuasi debit air limbah harian yang tinggi, perubahan karakteristik Tandan Buah Segar (TBS) yang diolah, hingga penumpukan padatan pada kolam anaerobik sering kali memicu *shock loading* yang menurunkan kinerja IPAL (Nabilah et al., 2022). Akibatnya, kualitas air limbah pada titik keluaran (*outlet*) memiliki risiko besar untuk melampaui baku mutu yang ditetapkan. Oleh karena itu, sekadar memiliki unit IPAL tidaklah cukup dan diperlukan evaluasi teknis secara mendalam dan berkala terhadap kinerja masing-masing unit kolam pengolahan untuk memastikan parameter operasionalnya masih memenuhi kriteria desain standar (Koippully et al., 2026).

Studi terdahulu terkait operasional IPAL kelapa sawit umumnya hanya menitikberatkan pada analisis kinerja berdasarkan efisiensi penyisihan parameter pencemar secara kuantitatif, seperti persentase penurunan BOD, COD, dan TSS antara titik *inlet* dan *outlet* (Nabilah et al., 2022). Penelitian tersebut cenderung berfokus pada hasil akhir kualitas air limbah tanpa membandingkan secara komprehensif antara kinerja aktual dengan kriteria desain eksisting dari unit pengolahan fisik yang digunakan. Di sisi lain, optimalisasi penyisihan beban pencemar sangat bergantung pada kesesuaian aspek teknis dasar kolam pengolahan, seperti kecukupan dimensi, waktu retensi hidrolis (*Hydraulic Retention Time*/HRT), dan beban pemuatan organik harian (*Organic Loading Rate*/OLR) (Indaryani, 2020). Sedikitnya studi yang berfokus pada perbandingan antara efisiensi penyisihan dan evaluasi desain operasional inilah yang menyebabkan rekomendasi perbaikan IPAL sering kali tidak menyentuh akar permasalahan teknis di lapangan.

Berangkat dari urgensi tersebut, penelitian ini difokuskan untuk mengevaluasi efektivitas kinerja IPAL pada PKS PT. X di Provinsi Aceh. Tujuan utama dari kajian ini adalah menganalisis kualitas air limbah pada titik *inlet* dan *outlet* untuk memverifikasi tingkat pemenuhan baku mutu sesuai Permen LHK No. 5 Tahun 2014. Selain menghitung efisiensi penyisihan beban pencemar pada setiap unit pengolahan, penelitian ini juga mengevaluasi kesesuaian aspek teknis kolam eksisting terhadap kriteria desain literatur serta penyusunan rekomendasi yang menjawab permasalahan di IPAL PKS PT. X.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan deskriptif-analitis yang dilaksanakan di Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Pabrik Kelapa Sawit PT X, Provinsi Aceh. Alur unit pengolahan IPAL PKS di PT. X terdiri dari unit *fat pit*, *cooling pond,* anaerobik primer, anaerobik sekunder dan sedimentasi seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1. Pengambilan sampel air limbah pada studi ini dilakukan pada bulan April 2026 dan dilakukan pada 5 titik pengambilan yaitu titik outlet unit *fat pit, outlet* unit *cooling pond*, *outlet* unit kolam anaerobik primer, *outlet* unit kolam anaerobik sekunder, dan *outlet* unit kolam sedimentasi. Pengambilan sampel dilakukan dengan metode *grab sampling* (SNI 6989.59:2008) dan tanpa mempertimbangkan estimasi waktu aliran limbah antarkolam (*time-lag sampling*) dan sebanyak 1 unit sampel diambil pada setiap titik sampel.

DOI: https://doi.org/10.54082/jupin.2933
p-ISSN: 2808-148X
e-ISSN: 2808-1366

Pengujian parameter kualitas air limbah dilakukan di laboratorium dengan mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI) dan/atau *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Analisis laboratorium mencakup pengukuran pH menggunakan metode SNI 6989.11.2019, BOD (SNI 6989.72:2009), COD dengan metode spektrometri (SNI 6989.2:2019), *Total Suspended Solids* (TSS) secara gravimetri (SNI 6989.3:2019), Minyak dan Lemak (SNI 6989.10:2011), serta Nitrogen Total (SNI 6989.52:2005). Hasil uji efluen IPAL selanjutnya dibandingkan dengan baku mutu lingkungan yang ditetapkan dalam Permen LHK No. 5 Tahun 2014 Lampiran III.

Efektivitas setiap unit pengolahan dalam menurunkan beban pencemar dihitung menggunakan persamaan efisiensi penyisihan (von Sperling, 2007):

$$Efisiensi(\%) = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\%$$

dimana C_{in} merupakan konsentrasi parameter pencemar pada air limbah yang masuk (*inlet*) dan C_{out} merupakan konsentrasi pencemar pada air limbah yang keluar (*outlet*).

Evaluasi aspek teknis IPAL dilakukan dengan membandingkan parameter kondisi lapangan dengan kriteria desain literatur dan dokumen nota desain PT X. Dua parameter operasional utama yang dihitung adalah *Hydraulic Retention Time* (HRT) dan *Organic Loading Rate* (OLR). HRT dihitung menggunakan persamaan:

$$HRT = \frac{V}{Q}$$

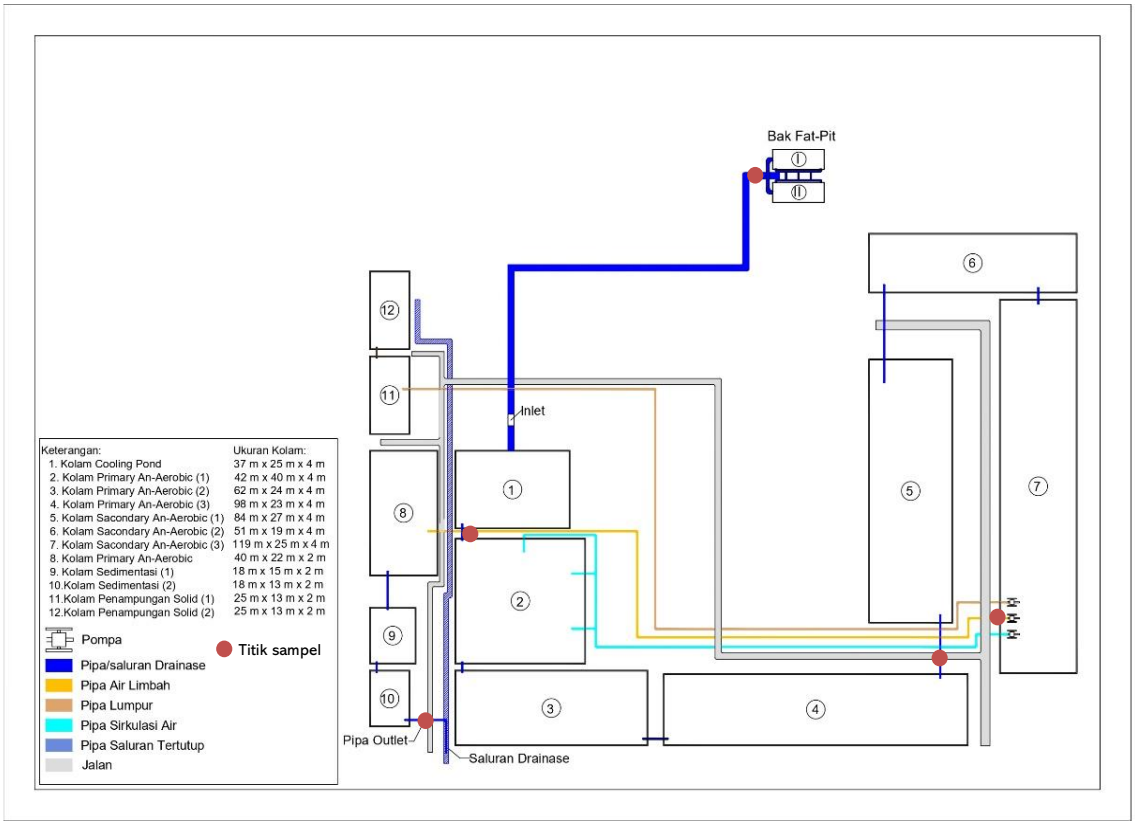
dimana V adalah volume efektif kolam (m³) dan Q adalah debit aliran limbah (m³/hari). Sementara itu, OLR dihitung dengan persamaan:

$$OLR = \frac{Q \times BOD_{in}}{V}$$

dimana BOD_{in} adalah konsentrasi BOD pada *inlet* (kg/m³).

Untuk menghitung volume efektif aktual kolam, dilakukan pengukuran ketebalan sedimen (endapan lumpur) guna mengetahui tingkat pendangkalan. Pengukuran ketebalan lumpur dilakukan menggunakan metode manual dengan penggunaan tongkat yang diukur dari titik tengah kolam *cooling pond*, anaerobik primer dan sekunder, dan sedimentasi. Kedalaman efektif kolam kemudian didapatkan dengan mengurangkan kedalaman desain awal kolam dengan rata-rata ketebalan endapan lumpur aktual yang terukur.

DOI: https://doi.org/10.54082/jupin.2933
p-ISSN: 2808-148X
e-ISSN: 2808-1366



Gambar 1. Alur unit pengolahan IPAL PKS di PT. X

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini berfokus pada evaluasi performa IPAL PKS di PT. X yang merujuk pada kemampuan penyisihan pencemar dan kesesuaian desain eksisting terhadap kriteria desain. Secara keseluruhan, hasil studi menunjukkan terdapat parameter pencemar yang tidak memenuhi baku mutu lingkungan serta desain operasional eksisting yang tidak sesuai dengan standar desain seperti HRT dan OLR.

3.1. Karakteristik Air Limbah dan Efektivitas Penyisihan Polutan di IPAL

Kualitas air limbah PKS dari unit pengolahan fat pit hingga effluent kolam sedimentasi (terakhir) dapat di lihat di Tabel X. Berdasarkan Permen LH No 5 Tahun 2014 Lampiran III tentang baku mutu air limbah pengolahan kelapa sawit, menunjukkan bahwa hanya parameter TSS, minyak dan Lemak serta pH yang memenuhi, sedangkan parameter BOD, COD, dan Total Nitrogen melebihi baku mutu lingkungan.

Tabel 2. menunjukkan bahwa IPAL mampu memberikan efisiensi penyisihan yang cukup tinggi terhadap seluruh parameter yang dianalisis, dengan nilai efisiensi tertinggi diperoleh pada parameter TSS sebesar 97,23%, diikuti oleh BOD sebesar 90,44%, COD sebesar 89,41%, Nitrogen Total sebesar 75,36%, serta Minyak dan Lemak sebesar 73,40%. Namun, kemampuan penyisihan tersebut belum mampu menghasilkan kualitas effluent yang memenuhi baku mutu air limbah yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 bagi usaha dan/atau kegiatan industri minyak sawit. Diketahui bahwa parameter TSS (0,385 mg/L) dan Minyak dan Lemak (1,250 mg/L) telah memenuhi baku mutu yang dipersyaratkan (250 mg/L dan 25 mg/L), sedangkan parameter BOD (430 mg/L), COD (1800 mg/L), dan Nitrogen Total (209,39 mg/L) masih melampaui baku mutu yang ditetapkan (100 mg/L, 350 mg/L, dan 50 mg/L), sehingga meskipun efisiensi penyisihannya tergolong tinggi, beban pencemar awal yang sangat besar menyebabkan konsentrasi effluent pada ketiga parameter tersebut belum sepenuhnya memenuhi ketentuan baku mutu yang berlaku.

Jurnal Penelitian Inovatif (JUPIN)
Vol. 6, No. 5, November 2026, Hal. 3839-3850
https://jurnal-id.com/index.php/jupin
DOI: https://doi.org/10.54082/jupin.2933
p-ISSN: 2808-148X
e-ISSN: 2808-1366

Tabel 1. Hasil Uji Laboratorium Kualitas Air Limbah pada Unit Pengolahan IPAL PT. X

No.	Parameter	Satuan	Hasil Analisis					Baku Mutu*	Keterangan **
			Outlet *Fat Pit*	Outlet *Cooling Pond*	Outlet Anaerobik Primer	Outlet Anaerobik Sekunder	Outlet Sedimentasi		
1.	BOD	mg/L	4.500	6.000	400	520	430	100	TM
2.	COD	mg/L	17.000	22.000	11.000	1.500	1.800	350	TM
3.	TSS	mg/L	13,9	-	2,00	0,70	0,385	250	M
4.	Minyak dan Lemak	mg/L	4,70	6,91	-	-	1,25	25	M
5.	Nitrogen Total	mg/L	849,65	-	266,99	209,37	209,39	50	TM
6.	pH	-	5,0	5,0	8,0	9,0	8,0	6,0 – 9,0	M
7.	Suhu	°C	90-95	62	-	-	-	-	

Keterangan:
Tanda strip (-) = Parameter tidak diuji
*PermenLH No. 5 Tahun 2014 Lampiran III
**TM (Tidak Memenuhi) dan M (Memenuhi)

Tabel 2. Persentase Penyisihan Polutan pada Unit Pengolahan IPAL PT. X

Parameter	Penyisihan (%)				
	Cooling Pond	Anaerobik Primer	Anaerobik Sekunder	Sedimentasi	IPAL Keseluruhan*
BOD	-33,33	93,33	-30	17,31	90,44
COD	-29,41	50	86,36	-20	89,41
TSS	-	-	65	45	97,23
Nitrogen Total	-	-	21,38	-0,01	75,36
Minyak dan Lemak	-46,91	-	-	-	73,40

Keterangan:
Tanda strip (-) = Parameter tidak diuji
*Fat Pit hingga sedimentasi

Kinerja *cooling pond* seperti pada Tabel 3.1 dan 3.2 tergolong belum optimal. Meskipun suhu mengalami penurunan dari 95°C menjadi 62°C, angka ini masih jauh di atas kisaran ideal bagi bakteri mesofilik (35–38°C), sehingga fungsi pendinginan belum tercapai. Unit anaerobik primer menunjukkan kinerja penyisihan yang relatif baik. Parameter BOD turun signifikan dari 6.000 mg/L menjadi 400 mg/L (efisiensi 93,33%) sementara COD turun dari 22.000 mg/L menjadi 11.000 mg/L (efisiensi 50%) dan nitrogen total turun dari 266,99 mg/L menjadi 209,37 mg/L (efisiensi 21,58%). Hasil ini menandakan bakteri anaerobik, khususnya kelompok hidrolitik dan asidogenik, sudah bekerja aktif di unit ini. Meski begitu, penyisihan COD dan nitrogen belum optimal. Hal ini dikarenakan suhu influen kolam Anaerobik yang masih tinggi, yakni 62°C, jauh melampaui suhu optimal bakteri mesofilik (35–38°C) (Astuty et al., 2025). Suhu ekstrem ini menekan aktivitas enzim mikroorganisme sehingga laju penguraian senyawa organik tidak berjalan optimal.

Kinerja unit anaerobik sekunder bervariasi antar parameter. COD turun signifikan dari 11.000 menjadi 1.500 mg/L (efisiensi 86,36%) dan TSS turun dari 2,00 menjadi 0,70 mg/L (efisiensi 65%). Namun BOD naik dari 400 menjadi 520 mg/L (efisiensi −30%), diikuti penurunan nitrogen total dari 266,99 menjadi 209,37 mg/L (efisiensi 21,58%). Kenaikan BOD dan nitrogen ini diduga akibat desorpsi, yaitu lepasnya kembali senyawa organik dan nutrien terlarut dari lumpur biologis yang menumpuk tebal di dasar kolam 1,71–2,32 m (Astuty et al., 2025). Penumpukan lumpur ini mengurangi volume efektif

DOI: https://doi.org/10.54082/jupin.2933
p-ISSN: 2808-148X
e-ISSN: 2808-1366

kolam sehingga HRT turun menjadi hanya 1–5 hari. HRT yang jauh di bawah standar ini memicu *organic overloading* lokal yang mengacaukan keseimbangan mikroba, terutama bakteri metanogenik yang berperan di tahap akhir degradasi anaerobik, sehingga pengolahan biologis tidak optimal dan kualitas efluen menurun sebelum masuk ke unit berikutnya.

Kolam sedimentasi efektif untuk penyisihan TSS yang turun dari 0,70 menjadi 0,385 mg/L (efisiensi 45%) dan penyisihan BOD yang turun dari 520 menjadi 430 mg/L (efisiensi 17,31%). Hal menunjukkan proses pengendapan gravitasi berjalan efektif akibat kecepatan pengendapan partikel (flok) yang terbentuk lebih besar dari kecepatan aliran. Sebaliknya, COD naik dari 1.500 menjadi 1.800 mg/L (efisiensi −20%), sementara nitrogen total cenderung tidak berubah, dari 209,372 menjadi 209,394 mg/L (efisiensi−0,01%). Kenaikan COD ini diduga berasal dari degradasi anaerobik yang tidak sempurna pada lumpur organik yang mengendap di dasar kolam (tebal 0,20–0,43 m) sehingga senyawa organik terlarut berpotensi terlepas kembali ke air. Sementara itu, tingginya nitrogen di efluen akhir disebabkan tidak adanya zona anoksik maupun aerobik di IPAL sehingga proses nitrifikasi-denitrifikasi tidak dapat berlangsung. Pada proses pengolahan, proses nitrifikasi membutuhkan suplai oksigen yang cukup sehingga bakteri autotorof dapat mengoksidasi amonia menjadi nitrit dan kemudian menjadi nitrat. Selanjutnya, tahap denitrifikasi memerlukan zona anoksik agar bakteri heterotrof dapat mereduksi nitrat menjadi menjadi gas nitrogen (N_2) (Noor et al., 2023).

3.2. Evaluasi Aspek Teknis IPAL

Evaluasi aspek teknis dilakukan dengan membandingkan kondisi eksisting hasil pengukuran lapangan terhadap kriteria desain standar yang berlaku seperti pada Tabel 3.3. Berdasarkan hasil evaluasi, unit *Cooling Pond* eksisting tidak sepenuhnya memenuhi kriteria desain standar yang berlaku. Parameter rasio panjang terhadap lebar (P: L) sebesar 1,68:1 masih berada dalam rentang yang disyaratkan, yaitu 1,5:1 hingga 2:1, sehingga dinyatakan memenuhi kriteria desain. Namun demikian, parameter kedalaman menunjukkan ketidaksesuaian yang signifikan, kedalaman aktual kolam hanya sebesar 1,13 m, jauh di bawah kedalaman desain awal sebesar 4 meter.

Kondisi ini disebabkan oleh akumulasi lumpur yang parah akibat minimnya frekuensi pengerukan, sehingga mengakibatkan pendangkalan kolam secara substansial. berkurangnya kedalaman efektif tersebut berdampak langsung pada penurunan kapasitas tampung kolam, yang selanjutnya menyebabkan HRT turun dari perencanaan awal sebesar 4 hari menjadi hanya 1 hari. meskipun nilai HRT sebesar 1 hari secara teknis masih berada dalam batas minimum standar yang disyaratkan, yakni 1–3 hari, kondisi tersebut tidak dapat dikatakan optimal. HRT yang lebih panjang, idealnya mendekati atau melebihi 3 hari, memberikan waktu yang lebih memadai bagi air limbah untuk melepaskan panas secara alami sebelum masuk ke unit pengolahan biologis. dengan HRT hanya 1 hari, waktu kontak antara air limbah dan atmosfer menjadi sangat terbatas, sehingga proses pendinginan tidak berlangsung secara efektif.

Kondisi tersebut diperburuk oleh akumulasi lapisan scum minyak yang tebal pada permukaan kolam, yang secara fisik menghambat pelepasan panas ke udara. Sebagai akibatnya, suhu efluen tercatat tetap tinggi pada 62 °C, jauh melampaui kisaran target 35–38 °C yang diperlukan untuk mendukung pertumbuhan bakteri mesofilik pada unit pengolahan anaerobik selanjutnya (Mohammad et al., 2021).

Selanjutnya, seluruh parameter pada kolam anaerobik primer tidak memenuhi kriteria desain standar. Ketidaksesuaian dengan kriteria desain terdapat pada kedalaman kolam, di mana akumulasi lumpur setebal 1,34–1,82 m mereduksi kedalaman efektif desain awal 4 m menjadi hanya 2,18–2,66 m. Pengurangan volume spesifik kolam berpengaruh terhadap parameter hidrolik dan organik di mana HRT aktual berkisar di antara 4–5 hari, jauh di bawah standar optimal yaitu 30–40 hari (Jusoh dkk., 2023). Selain itu, keterbatasan volume aktif menyebabkan *Organic Loading Rate* (OLR) kolam primer 1 melonjak hingga 0,55 kg BOD/m³/hari, melampaui batas atas standar acuan 0,1–0,4 kg BOD/m³/hari. Pada aspek rasio dimensi P:L, ditemukan ketidaksesuaian dengan kriteria desain yaitu pada kolam anaerobik primer 1 (1,05:1) dan kolam anaerobik primer 3 (4,26:1) menyimpang dari standar ideal 1,5:1 hingga 2,5:1. Hal ini yang berisiko memicu distribusi aliran tidak merata (*dead zone*) sehingga distribusi beban organik tidak merata di seluruh kolam.

DOI: https://doi.org/10.54082/jupin.2933
p-ISSN: 2808-148X
e-ISSN: 2808-1366

Tabel 3. Perbandingan Kriteria Desain dan Operasional Desain di IPAL PKS PT. X

No.	Unit Pengolahan	Parameter Kriteria Desain	Nilai Standar Acuan	Data Aktual Lapangan	Kesimpulan Evaluasi
1.	*Fat Pit*	• Waktu Tinggal Hidrolis (*HRT*)	2 – 6 Jam (von Sperling, 2007)	12 Jam	Sesuai
		• Kedalaman Efektif (*D*)	2 – 3,5 m (Jepang & Indonesia, 2013)	2 m	Sesuai
		• Rasio Panjang dan Lebar (*P*: *L*)	1,5 : 1 – 3 : 1 (Metcalf & Eddy et al., 2014)	2,43 : 1	Sesuai
2.	*Cooling Pond*	• *Hydraulic Retention Time* (HRT)	1 – 3 Jam (Mohammad et al., 2021)	1 Hari	Sesuai
		• Kedalaman Efektif (*D*)	2,5 – 3,5 m (Kou et al., 2024)	1,13 m	Tidak Sesuai
		• Rasio Panjang dan Lebar (*P*: *L*)	1,5 : 1 – 2 : 1(Kou et al., 2024)	1,68 : 1	Sesuai
		• Suhu Akhir *efluent*	35 – 38°C (von Sperling, 2007)	62°C	Tidak Sesuai
3	Anaerobik Primer 1, 2 dan 3	• *Hydraulic Retention Time* (HRT)	12 Hari (von Sperling, 2007)	14 Hari	Tidak Sesuai
		• Kedalaman Efektif (*D*)	4 – 5 m (Noor et al., 2023)	2,32 m, 2,50 m dan 2,18 m	Tidak Sesuai
		• Rasio Panjang dan Lebar (*P*: *L*)	1,5 : 1 – 2,5 : 1 (Noor et al., 2023)	1,05 : 1; 2,58 : 1; 4,26 : 1	Tidak Sesuai
		• *Organic Loading Rate* (OLR)	0,1 – 0,4 Kg BOD/m^3/hari (von Sperling, 2007)	0,55 Kg BOD/m^3/hari	Tidak Sesuai
4	Anaerobik Sekunder 1, 2 dan 3	• *Hydraulic Retention Time* (HRT)	12 Hari (PT X, 2026)	9 Hari	Tidak Sesuai
		• Kedalaman Efektif (*D*)	3,5 – 4,5 m (Islam et al., 2018)	2,01 m, 1,68 m dan 2,29 m	Tidak Sesuai
		• Rasio Panjang dan Lebar (*P*: *L*)	1,5 : 1 – 2,5 : 1 (von Sperling, 2007)	3,11:1; 2,68:1; 4,26:1	Tidak Sesuai
		• *Organic Loading Rate* (OLR)	0,1 – 0,4 Kg BOD/m^3/hari (von Sperling, 2007)	0,047 kg BOD m^3/hari	Tidak Sesuai
5	Sedimentasi 1 dan 2	• *Hydraulic Retention Time* (HRT)	1 – 3 Hari (von Sperling, 2007)	10 Jam dan 7 Jam	Tidak Sesuai

DOI: https://doi.org/10.54082/jupin.2933
p-ISSN: 2808-148X
e-ISSN: 2808-1366

No.	Unit Pengolahan	Parameter Kriteria Desain	Nilai Standar Acuan	Data Aktual Lapangan	Kesimpulan Evaluasi
		• Kedalaman Efektif (*D*)	3 – 4 m (von Sperling, 2007)	1,57 m dan 1,80 m	Tidak Sesuai
		• Rasio Panjang dan Lebar (*P*: *L*)	1,5 : 1 – 3 : 1 (von Sperling, 2007)	1,20:1 dan 1,38:1	Tidak Sesuai

Ketidaksesuaian terhadap kriteria HRT, kedalaman efektif, organic loading rate dan rasio P:L juga ditemukan pada kolam Anaerobik sekunder. Pertama, pendangkalan akibat akumulasi lumpur masif setebal 1,71–2,32 m mereduksi kedalaman efektif kolam dari desain awal 3,5–4,5 m menjadi hanya 1,68–2,29 m. Reduksi kapasitas volumetrik tersebut berdampak langsung pada parameter HRT yang turun menjadi 1–4 hari, sangat jauh di bawah standar acuan 20–30 hari (Islam dkk., 2018). Ketidaksesuaian juga terlihat pada parameter *Organic Loading Rate* (OLR) Kolam Sekunder yang bernilai 0,047 kg BOD/m³/hari yang jauh di bawah rentang standar 0,1–0,4 kg BOD/m³/hari (*underloading*). konsekuensinya, singkatnya waktu kontak hidrolis dan rendahnya beban organik yang masuk membuat proses metanogenesis tidak dapat berlangsung secara optimal.

Selain kendala kapasitas, efisiensi kolam juga dipengaruhi oleh ketidaksesuaian dimensi. Rasio panjang terhadap lebar (P:L) pada kolam sekunder 1 (3,11:1) dan kolam sekunder 3 (4,26:1) lebih besar dari rentang standar 1,5:1–2,5:1. konfigurasi kolam yang terlalu memanjang ini sangat berpotensi memicu fenomena aliran pintas (*short-circuiting*) pada air limbah. Sementara itu, Kolam Sekunder 2 memiliki rasio 2,68:1 yang sedikit melampaui batas atas toleransi desain.

Unit sedimentasi juga menunjukkan ketidaksesuaian desain berdasarkan standar literatur. HRT aktual kolam sedimentasi 1 hanya mencapai 10 jam, sementara kolam sedimentasi 2 hanya 7 jam, jauh di bawah standar minimum 1 hari (Sperling, M. 2007). Kondisi ini disebabkan oleh pendangkalan akibat akumulasi lumpur setebal 0,15–0,20 m, yang mereduksi kedalaman efektif dari desain awal 2 m menjadi hanya 1,57–1,80 m, masih di bawah batas minimum standar sebesar 3 m. Selain itu, rasio P:L kedua kolam yang hanya berkisar 1,20:1 hingga 1,38:1 menunjukkan bentuk kolam yang terlalu mendekati persegi, di bawah batas minimum standar 1,5:1, sehingga efisiensi pola aliran laminar dan proses pengendapan gravitasi tidak dapat berlangsung secara optimal. Secara keseluruhan, kinerja unit sedimentasi masih perlu ditingkatkan melalui pengerukan lumpur berkala dan peninjauan ulang terhadap dimensi serta kapasitas kolam.

3.3. Rekomendasi Perbaikan Kinerja IPAL

Berdasarkan hasil analisis pada 3.1. dan 3.2, rekomendasi perbaikan kinerja IPAL PKS di PT. X disusun berdasarkan observasi lapangan dan studi literatur. Rekomendasi optimalisasi IPAL eksisting adalah sebagai berikut.

1. Pelaksanaan Program Pengerukan Lumpur (*Desludging*) Secara Berkala dan Terencana

Pengerukan lumpur merupakan tindakan korektif paling mendesak bagi pemulihan kinerja IPAL. Mengacu pada Rahardjo (2017), pengerukan menyeluruh disarankan dilaksanakan minimal setiap 3–5 tahun, dengan prioritas pada unit *cooling pond* (akumulasi 2,42 m) dan anaerobik sekunder 2 (2,32 m). Program ini hendaknya diformalisasikan melalui SOP pemantauan ketebalan lumpur setiap tiga bulan menggunakan metode sounding manual, dengan ambang batas intervensi ditetapkan saat ketebalan lumpur mencapai 50% dari kedalaman desain kolam. Lumpur hasil pengerukan dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik setelah melalui proses pengeringan dan stabilisasi yang memadai.

2. Optimalisasi Kinerja *Cooling Pond* melalui Pengendalian Scum dan Peningkatan kapasitas pendinginan

Setelah pengerukan dilaksanakan, pemasangan sistem *skimmer* otomatis direkomendasikan untuk menggantikan metode pengutipan *scum* manual yang tidak efisien. Sebagai langkah penguatan,

DOI: https://doi.org/10.54082/jupin.2933
p-ISSN: 2808-148X
e-ISSN: 2808-1366

pemasangan aerator permukaan bertekanan rendah dapat dipertimbangkan guna meningkatkan laju transfer panas dan mempercepat proses pendinginan (Rois dkk., 2017). Pemasangan termometer digital secara permanen pada titik *outlet* kolam juga dianjurkan untuk memungkinkan pemantauan suhu efluen secara *real-time* dan respons korektif yang tepat waktu.

3. Penambahan unit pengolahan lanjutan untuk penyisihan nitrogen dan beban organik sisa

Mengingat konsentrasi BOD (430 mg/L), COD (1.800 mg/L), dan nitrogen total (209,39 mg/L) pada efluen akhir yang masih melampaui baku mutu, sistem IPAL PKS PT. X memerlukan unit pengolahan lanjutan (*advanced treatment*). Tiga alternatif yang dapat dipertimbangkan yaitu (1) *Constructed Wetland* atau kolam stabilisasi aerobik sebagai unit *polishing* untuk mereduksi BOD dan COD sisa, (2) zona anoksik sebelum unit sedimentasi untuk denitrifikasi biologis guna menurunkan nitrogen total hingga di bawah 50 mg/L dan (3) sistem aerasi mekanis pada kolam akhir untuk meningkatkan oksigen terlarut dan mempercepat degradasi organik sisa. pemilihan alternatif hendaknya didasarkan pada kajian teknis-ekonomis yang komprehensif, dengan mempertimbangkan ketersediaan lahan dan kapasitas produksi pabrik.

4. KESIMPULAN

Efluen akhir IPAL pada outlet kolam sedimentasi belum sepenuhnya memenuhi baku mutu sesuai Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 5 Lampiran III Tahun 2014. Dari enam parameter yang diuji, hanya TSS (0,385 mg/L), minyak dan Lemak (1,250 mg/L) serta pH (8,0) yang memenuhi baku mutu, sedangkan tiga parameter lainnya masih melampaui ambang batas, yaitu BOD 430 mg/L (baku mutu 100 mg/L), COD 1.800 mg/L (baku mutu 350 mg/L) dan nitrogen total 209,39 mg/L (baku mutu 50 mg/L).

Efisiensi penyisihan polutan menunjukkan variasi yang signifikan antarunit pengolahan. Unit anaerobik primer mencatat efisiensi penyisihan BOD tertinggi, yaitu 93,33%, sementara unit anaerobik sekunder berkontribusi pada penyisihan COD sebesar 86,36% dan TSS sebesar 65%. Sebaliknya, unit cooling pond kurang optimal dalam pengolahan, yang ditandai dengan peningkatan konsentrasi BOD (33,33%) dan COD (29,41%) akibat akumulasi lumpur dan scum. Unit sedimentasi hanya mampu menyisihkan TSS sebesar 45% dan BOD sebesar 17,31%, bahkan mengalami peningkatan COD sebesar 20% akibat desorpsi organik dari endapan lumpur. Secara kumulatif, efisiensi penyisihan BOD dari inlet fat pit hingga outlet sedimentasi mencapai 90,4%, namun konsentrasi pada efluen akhir tetap melampaui baku mutu yang dipersyaratkan.

Sebagian besar unit pengolahan belum memenuhi kriteria desain standar. Hanya unit *fat pit* yang memenuhi seluruh parameter desain, meliputi HRT 12 jam, kedalaman 2 m, dan rasio P:L 2,43:1, sementara unit cooling pond tidak memenuhi standar kedalaman efektif (1,58 m, standar 2,5–3,5 m) maupun suhu *effluent* (62°C, standar 35–38°C). Seluruh unit anaerobik mengalami ketidaksesuaian pada HRT, yang menurun dari 20–40 hari menjadi hanya 14 dan 9 hari akibat akumulasi lumpur setebal 1,34–2,32 m. Kedua unit sedimentasi juga tidak memenuhi standar HRT, kedalaman, maupun rasio P:L. ketidaksesuaian ini bersumber dari tiga faktor utama, yaitu tidak adanya program pengerukan lumpur terjadwal dan tidak tersedianya unit penyisihan nitrogen.

Perbaikan kinerja IPAL yang direkomendasikan meliputi pengerukan lumpur (*desludging*) secara berkala pada seluruh unit pengolahan untuk mengembalikan kapasitas efektif kolam serta meningkatkan Hydraulic Retention Time (HRT), perbaikan fungsi cooling pond sehingga suhu limbah yang memasuki kolam anaerobik berada pada kisaran 35–38°C, serta penambahan unit penyisihan nitrogen untuk menurunkan kadar nitrogen total hingga memenuhi baku mutu. Selain itu, diperlukan penerapan program operasi dan pemeliharaan terjadwal, mencakup pemantauan kualitas air limbah, pengukuran ketebalan lumpur, dan inspeksi berkala pada setiap unit pengolahan, guna menjaga kinerja IPAL secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Astuty, E. K. A. P., Anshari, G. Z., Akbar, A. J. I. A. L. I., Lingkungan, M. I., & Tanjungpura, U. (2025). *Evaluasi Proses Anaerobik Dan Aerobik Pada Instalasi Pengolahan Air Limbah Pabrik Kelapa*

DOI: https://doi.org/10.54082/jupin.2933
p-ISSN: 2808-148X
e-ISSN: 2808-1366

Sawit Berdasarkan Parameter Fisikokimia Air. *13*(1).

Barus, P., & Ahsan, A. (2025). Hubungan usaha perkebunan kelapa sawit dengan pengentasan kemiskinan melalui penciptaan lapangan kerja: Studi kasus empat kabupaten di Riau. *Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia*, *10*(4), 4168–4179. https://doi.org/10.36418/syntax-literate.v10i4.58626

Descals, A., Gaveau, D. L. A., Wich, S., Szantoi, Z., & Meijaard, E. (2024). Global mapping of oil palm planting year from 1990 to 2021. *Earth System Science Data*, *16*, 5111–5129. https://doi.org/10.5194/essd-16-5111-2024

Devianto, H., & Sasongko, D. (2021). *Photocatalytic Degradation of Palm Oil Mill Effluent (POME) Waste Using BiVO 4 Based Catalysts*.

Dewi, S. S., & Lamona, A. (2025). Pengaruh limbah cair kelapa sawit terhadap kesehatan lingkungan di PT Incasi Raya Group. *Jurnal Kesehatan Lentera 'Aisyiyah*, *8*(1), 30–37.

Indaryani, F. (2020). *Evaluasi dan Desain Ulang Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di Rumah Susun Sederhana Sewa Randu Kota Surabaya*. *9*(2).

Irvan. (2018). Processing of palm oil mill wastes based on zero waste technology Processing of palm oil mill wastes based on zero waste technology. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. https://doi.org/10.1088/1757-899X/309/1/012136

Islam, M. S., Baini, R., Tanjong, S. J., Said, M. A. M., & Joy, E. J. (2018). Effects of Hydraulic Retention Time and Solid Retention Time of POME on COD Removal Efficiency. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, *15*(2).

Jamidi, Muatho, I., M., Nasruddin, Ismadi, & Baidhawi. (2025). Agroclimatic suitability analysis for oil palm under projected climate in North Aceh Regency, Indonesia. *Journal of Agrometeorology*, *27*(2), 177–183. https://doi.org/10.54386/jam.v27i2.2662

Kahani, L., Nurjannah, L., & Baihaqi, A. (2024). Analisis risiko pada rantai pasok kelapa sawit melalui pendekatan House of Risk di Kabupaten Nagan Raya. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, *9*(4), 312–329. https://doi.org/10.17969/jimfp.v9i4.32766

Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia. (2014). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah. In *Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia*.

Koippully, S., Hasnain, M., Zainab, R., Ridouane, F. L., Al, A., Sheteiwy, M., Abideen, Z., & El-keblawy, A. (2026). Environmental Technology & Innovation Treating palm oil mill effluent (POME): Opportunities , challenges , and sustainable practices. *Environmental Technology & Innovation*, *42*(March), 104857. https://doi.org/10.1016/j.eti.2026.104857

Kou, Q., Yuan, Q., Chen, S., Xu, H., Wei, S., & Wang, K. (2024). *Alkaline pre-fermentation promotes anaerobic digestion of enhanced membrane coagulation (EMC) sludge: Performance and microbial community response*.

Meena, R. A., J., M., Banu, J. R., Bhatia, S. K., Kumar, V., Piechota, G., & Kumar, G. (2023). A review on the pollution assessment of hazardous materials and the resultant biorefinery products in palm oil mill effluent. *Environmental Pollution*, *328*. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121525

Metcalf & Eddy, I., Tchobanoglous, G., Stensel, H. D., Tsuchihashi, R., & Burton, F. L. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery*. McGraw-Hill Education.

Mohammad, S., Baidurah, S., Kobayashi, T., Ismail, N., & Leh, C. P. (2021). *Palm Oil Mill Effluent Treatment Processes—A Review*. 1–22.

Nabilah, Y., Putri, T. N., Widiasa, I. N., Tito, A., & Adyaksa, M. N. (2022). *Evaluasi Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) di PT. Rohul Sawit Industri*. *11*(2), 95–101.

Noor, M., Jusoh, H., Sukmono, Y., Aris, A., & Hadibarata, T. (2023). *Agro-based wastewater profile by biological treatment of pond treatment system in Kulai, Johor*. *13*(6), 1–17.

Ritonga, S., Triyanto, Y., & Sitanggang, K. D. (2021). *Pengaruh harga dan produktivitas kelapa sawit*

DOI: https://doi.org/10.54082/jupin.2933
p-ISSN: 2808-148X
e-ISSN: 2808-1366

terhadap kesejahteraan petani di Desa Janji Kecamatan Bilah Barat Kabupaten Labuhanbatu. *2*(1), 1–11.

Saad, M. S., Wirzal, M. D. H., & Putra, Z. A. (2021). Review on current approach for treatment of palm oil mill effluent: Integrated system. *Journal of Environmental Management*, *286*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112209

Supijatno. (2015). *Pengelolaan limbah kelapa sawit (Elaeis guineensis Jacq.) di perkebunan kelapa sawit, Riau*. *3*(2), 203–212.

Tang, Y. M., Tan, K. T., & Wong, L. P. (2024). Palm oil mill effluent (POME) as a source of biofuels and value-added products via oil recovery: A review. *Journal of Oil Palm Research*, *36*(3), 534–546. https://doi.org/10.21894/jopr.2023.0056

Trianita, D. A., Yuliani, E., & Prayogo, T. B. (2026). *Efisiensi Kinerja Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Komunal Kelurahan Ledok Kulon Kabupaten Bojonegoro*. *6*(1), 272–282.

Vijayan, V., Joseph, C. G., Taufiq-Yap, Y. H., Gansau, J. A., Nga, J. L. H., Li Puma, G., & Chia, P. W. (2024). Mineralization of palm oil mill effluent by advanced oxidation processes: A review on current trends and the way forward. *Environmental Pollution*, *342*. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.123099

von Sperling, M. (2007). Wastewater characteristics, treatment and disposal. In *Biological Wastewater Treatment Series* (Vol. 1). IWA Publishing. https://doi.org/10.2166/9781780402086

Yonas, R., & Irzandi, U. (2012). *Pengolahan limbah POME (palm oil mill effluent) dengan menggunakan mikroalga*. *1*(1), 7–13.